

独自機能をさらに追加し、 他のCFDソフトウェアでは成し得ない エンジン内部のエアレーション解析を実現

本田技研工業株式会社の二輪事業は1948年に始まり、その後発表された通勤車の定番スーパーカブを皮切りに数々のバイクブームを巻き起こした名車を生み出してきました。いち早く海外進出も進めてきたホンダのモーターサイクルは、現在では世界シェアNo.1の座を保ち続けており、高度な技術力とユーザーからの高い評価とともに業界をリードする存在となっています。今回は、この二輪事業を支える株式会社本田技術研究所二輪R&Dセンターの松井宏次様を訪問し、Particleworksを利用したエンジン潤滑油中の気泡挙動シミュレーションについてお話を伺いました。

二輪R&Dセンターの事業内容をご紹介下さい。

松井様:モーターサイクルは生活を自由に彩るツールとして、また快適で便利な移動手段として、世界中の人々から愛され続けています。弊社では、常に人々の感性や生活を原点とし「走る喜びをかたちにする」という創業以来の思想を守りながら、お客さまに喜ばれ、魅力あふれる新しいモーターサイクルを創り出していくため、高度なテクノロジーや最新の設備を駆使して信頼性の高い製品を研究開発しています。その開発製品は、超大型バイクから通勤や買い物の足として気軽に使えるファミリーバイクにいたるまで幅広い分野にわたっています。

ご所属部門のお仕事についてご紹介下さい。

松井様:モーターサイクルの部位の構成は、おおまかには車体系とエンジン系に大別されます。そのうち私の属しているのは、エンジン系の研究開発を担当する部署でして、先に挙げた「走る喜び」と地球環境の問題を同時に満足する優れたエンジンの具現化に日々取り組んでいます。エンジンの開発は、①コンセプト決め → ②エンジン諸元検討 → ③試作車設計・テスト → ④量産車設計・テスト → ⑤量産というプロセスで推進されます。これらのプロセスで“よりよい製品”を“より短期間”で生み出すためにCAEを最大限に活用しています。CAEを利用する分野および開発プロセスでのタイミングは多岐にわたります。エンジン系ですと、各部の強度計算、動弁系やクランク系の機構計算、出力特性に大きく影響する吸・排気系の諸元計算、冷却・潤滑系の計算などを、試作前の図面検討やテストを実施した際に発生するトラブルの対策検討に用いています。



株式会社本田技術研究所
二輪R&Dセンター
第2開発室 第1ブロック
松井宏次 様



CRF1000L Africa Twin (DCT仕様)

これまでエンジン設計においては どのような課題をお持ちだったのですか。

松井様:エンジンの開発段階では、耐久性を保证するための様々な課題がありますが、その中で今回紹介いたしますエンジンオイルへの気泡の混入についても、避けるべき重要な課題のひとつです。気泡がオイルに過度に混入することにより、すべり軸受けの金属同士が接触し、異常な摩耗や焼きつきを起こしてしまうからです。このようなオイルへの気泡の混入は、ギアなどの回転体による攪拌や、飛散油や還流油がオイル油面に滴下することで生じるのですが、エンジンの中のどこでそのような現象が起きているのかは、実際にエンジンを作ってみないとわかりませんでした。また、混入する気泡の量は運転条件によって大きく異なりますので、定量的には把握できていませんし、混入した気泡がどのように振る舞うかも解明されてはいませんでした。ですから、これまではエンジンを作ってみて気泡の混入が非常に多い場合は、可視化テストで対策を講じなければならず、コストも時間も非常にかかっていたのです。このような背景から、設計段階においてオイル中の気泡挙動を予測する手段として、CFDシミュレーションの活用を推進しています。

その一つとしてParticleworksをご利用になられているということですね。

松井様: CFDは、すでにエンジンの開発現場においては必須となっていたのですが、これまでの手法としては格子法を使ったシミュレーションが一般的でした。しかし格子法は、回転体によるオイルのかき上げや微細な気泡の挙動を表現するには不向きですし、計算コストの面でも課題がありました。そこで出会ったのがParticleworksです。現在私どもは、エンジン内部の様々なオイル挙動の予測にParticleworksを用いています(図1)。エンジン内壁への附着流れ、ギャなどでの攪拌、車体のジャンプや急旋回によるスロッシングなどで生じる複雑な自由表面を伴う現象を高速で計算するには、粒子法ソフトウェアは最も適した手法であると思います。

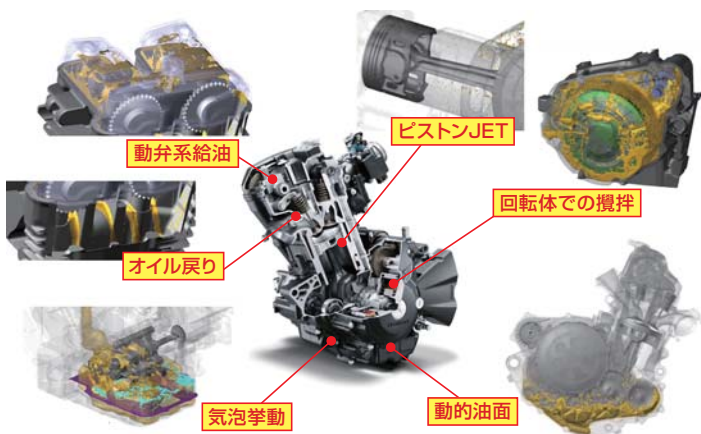


図1 オイル挙動解析へのParticleworks活用例

また今回、プロメテック様との共同開発によりParticleworksにさらに独自機能を追加することで解析が可能となったエアレーション機能につきましては、他の市販CFDソフトでは成しえない、気泡1つ1つの挙動を正確に予測できるものに仕上げることが出来ました。この開発は、現在も引き続きプロメテック様と共同で行っていますが、その第一報を2016年春の自動車技術会やPromotech Simulation Conferenceでもご紹介させていただきました。気泡の挙動には発生から移動・分離・合体を経て消滅するまでの様々な振る舞いがありますが、その中でも重要だった移動と消滅についてシミュレーションを行いました。その前段階として、まずは実際にエンジンの中の気泡の挙動を詳細に把握し、それらを数値モデルに置き換えるために、実機エンジンを用いて計測しました。

どのように実機で計測されているか
簡単にご紹介させていただきますか。

松井様: オイルに混入した気泡の観測のため、市販されている二輪車のエンジンを改造して用いました(図2)。このエンジンのオイル循環の仕組みですが、オイルパンに滞留したオイルは、ストレーナを介してポンプに吸い上げられます。その後クランクシャフト、シリンダヘッド、トランスミッションなどに圧送給油された後、クランクケース内を垂れ落ちてオイルパンに還流するようになっています。この中で、(a)還流オイルの滴下とギア攪拌により気泡が生じる位置、(b)ストレーナ内部、(c)ポンプ吐出口の3か所に可視化窓を備えたバイパス路を設けて、その中を通る気泡を高速度カメラで撮影しました。なお鮮明な気泡の画像を得るために、市販のエンジンオイルとは異なり、透明な特殊オイルを用いています。

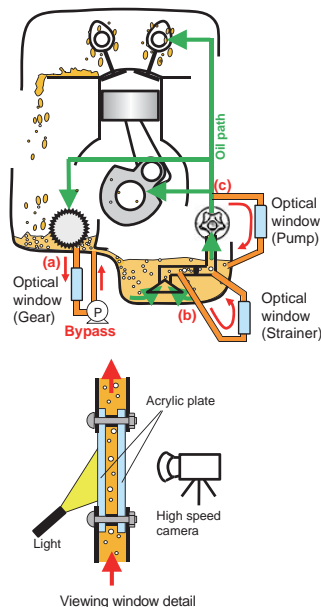


図2 エンジン運転時のオイル中の気泡を撮影するための可視化装置

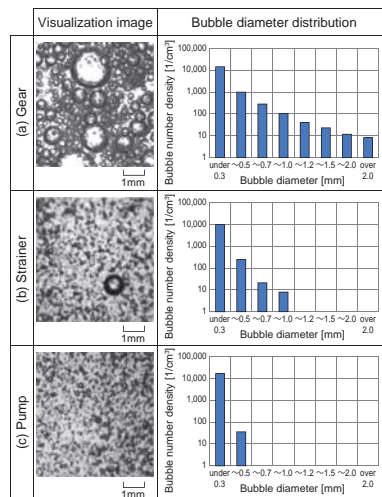


図3 気泡混入状態の画像と気泡径の分布

図3が、各位置の気泡混入状態を撮影した結果の画像と、その画像から目視で気泡の直径と数をカウントして示したのが右側のグラフで、横軸が気泡径、縦軸が1cm³中にあるその気泡径の気泡の数を示しています。これを見ると、どの計測場所においても直径0.3mm以下の気泡が非常に多く存在することが分かります。しかし、気泡が発生していると思われるギア部分には直径0.5mm以上の気泡もたくさん存在します。ところがストレーナからポンプへと向かうにつれ、どんどん径が大きい気泡が減少していきます。この結果からエンジン内部での気泡の振る舞いが分かりました。ギア部で発生した径の大きな気泡は移動し、その大部分は油面に浮かんで消滅します。しかし、一部はオイルの流れに乗ってストレーナに吸われてしまいます。吸われた気泡はポンプを通過することで細くなり、オイル中に残留することになります。ですから、軸受けに供給されるオイル中の気泡量の低減検討をするためには、直径0.3~2.0mm程度の範囲の気泡をターゲットに、それが油面に浮上して消滅するのか? ストレーナに吸われるのか? を予測することが大事だということがわかりました。そこで、今回はそれらの予測に必要な気泡の移動と消滅を優先的にモデル化しました。

それではシミュレーションで解析された
内容をお聞かせ下さい。

松井様: 今回は、オイルをMPS法、気泡をDEM法でそれぞれモデル化し、MPS-DEMの連成解析で気泡挙動のシミュレーションを行いました。気泡の挙動は気泡径に非常に左右されますので、DEMで一つ一つの気泡の径まで再現する方が良く、気泡の粒子径は可変にしています。ただし今回は、オイルの流れは気泡の流れに影響を与えますが、気泡の流れはオイルの流れに影響を与えないという片方向連成で解析しています。さらに、気泡粒子とオイル粒子は押しのけあうことなく、互いに同じ空間で重合して存在するという形にしました。

まず気泡の移動モデルについてですが、気泡の運動方程式には、Darmanaらの提唱する重力、浮力、抵抗力、揚力、仮想質量力の各作用力の他に、今回は壁との影響を考慮する壁接触力と気泡同士の衝突による接触力も加味いたしました。これらを用いた

MPS-DEM連成解析の確からしさを検証するために、油槽における単一気泡の浮上速度について実験とシミュレーションで比較を行いました。実験時は、気泡が油槽内の対流の影響を受けないように配慮し、オイルは実機観測した際に使った特殊オイルで25℃に設定しました。図4がその実験結果とシミュレーション結果との比較で、横軸が気泡径、縦軸が浮上速度です。左上の図は、浮上中の気泡を写真で捉えたものですが、オイル中では抵抗を受けて気泡が扁平しながら浮上している様子がわかります。今回のシミュレーションで抵抗力の算出に用いる抗力係数は水での実験式をベースにしているのですが、水中では気泡は真球に近い形状で浮上します。このような浮上中の気泡の形状の差異から、オイルを用いた場合での実験と良い相関を得るためには、抵抗力調整係数 β というものを乗じる必要がありました。次に、気泡がオイルの流れの影響を受ける状況下での浮上挙動の確からしさを検証しました。油槽の側壁に噴口を設けて、そこから気泡が混入したオイルを噴射するという装置で実験しました。図5は、オイル中を浮上する気泡群の比較で、左が実測で右がシミュレーションです。このように、小さい気泡は噴口から遠い位置に分布し、大きな気泡は噴口に近い位置を浮上する傾向は一致しています。また吹き出し口から30mm上方の位置における気泡径ごとの水平方向の移動量についてまとめました。その結果、実験とシミュレーション結果は概ね一致しており、オイルの流れ場の揺らぎや気泡同士の相互干渉の影響など、同じ気泡径でも水平移動距離にばらつきが出るところまで再現できました。

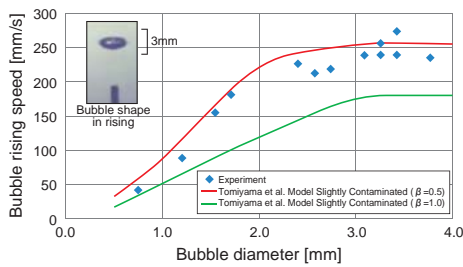


図4 静止オイル中の気泡浮上速度

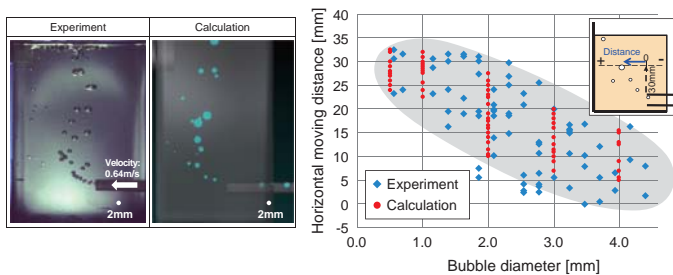


図5 オイルの流れの影響を受ける状況下での気泡挙動

次に気泡の消滅モデルですが、Nguyenらが示した、気泡が液面に浮上した後、時間経過につれ液膜が薄くなり、あるしきい値を超えたところで破裂するという考えに基づきました。液膜の薄化過程には毛管力によるものと重力によるものがあり、シミュレーションではその薄化2要因のうち時間が短い方を消滅時間として用います。こちらは静止した油槽に強制的に気泡を発生させ、油面に浮上した後、消滅するまでの時間について実験とシミュレーションで比較しました。図6がその結果で、横軸が気泡径、縦軸が気泡の消滅時間です。この結果を見ますと、直径1mmの気泡が一番長持ちすることがわかります。この傾向に関して実験とシミュレーション結果でよい相関が得られ、また、同一の気泡径の消滅時間のばらつきについても、乱数を導入し、ばらつきをもたせたことで、概ね表現できました。

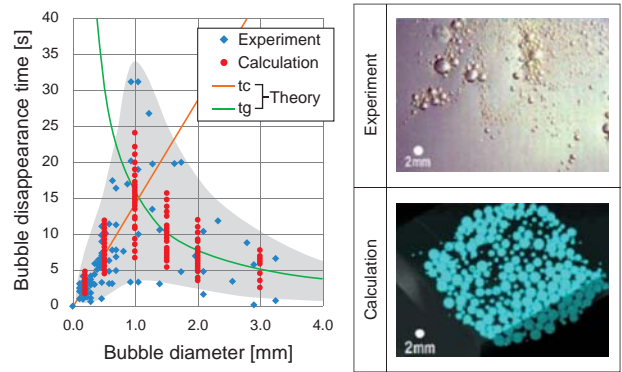


図6 気泡の消滅時間

最後にこれらを組み合わせて、簡単なテストを行いシミュレーションの確からしさを検証しました。この実験装置は、エンジンにおいて還流オイルが滴下して気泡が発生し、一部は油面に上昇して消滅し、他は強制対流に乗ってオイルパンへと流される過程を表しており、気泡を発生させる上段の油槽と、下段の油槽の間を樋で繋いでいます(図7)。この装置の中の、破線で示された部分を高速度カメラで撮影し、気泡数や気泡径分布を計測して検証しました。図8は左が実験の画像、右がシミュレーションの結果です。シミュレーションに関しては、気泡が自動的に発生する現象まではまだ再現できないので、実機で計測した気泡の発生量と気泡径の分布をユーザー定義で与えています。結果を見ると、しきり板のゾーンに大きな気泡が連なるように流れ出て、その下を比較的小さい気泡が挿入口に向かって流れている様子がうかがえます。これに関しては、シミュレーションも概ね一致しています。しかし、いったん油面まで浮上した大きな気泡が油中に戻り樋に吸い込まれるという現象が、実験よりもシミュレーションの方が顕著であるように見受けられます。次に、各部での気泡径ごとの残存率を求めました。図9は上段油槽(a)部にあった気泡が挿入口(b)部までたどり着いた割合を示しています。大きな気泡ほど、樋に辿り着かず消滅していることがわかり、その傾向は実験とシミュレーション結果で良い相関が取れています。ただし、シミュレーションの方が実験よりも若干残存率を高く見積もっているのは、前述の浮上後の気泡がもう一度吸い込まれてしまうことの影響だと思われます。図10は、挿入口(b)部の気泡のうち下段油槽(c)部まで残った割合を示しています。ここはほとんどの気泡は油面に浮上しているため、消滅が支配的な現象ですので、前述のように直径1mmの気泡の残存率がピークで、それ以上でも以下でも残りにくいという傾向になっており、実験とシミュレーション結果で非常に良い相関が得られています。

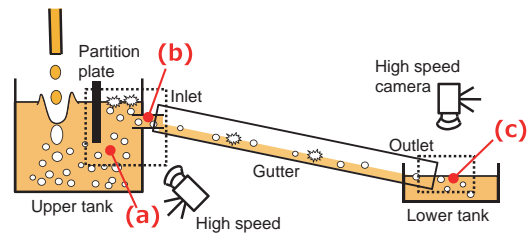


図7 エンジンを簡略化した実験装置での気泡挙動の観測

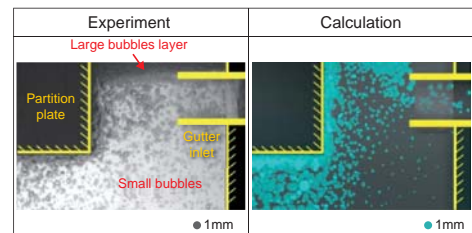


図8 上段油槽における気泡挙動

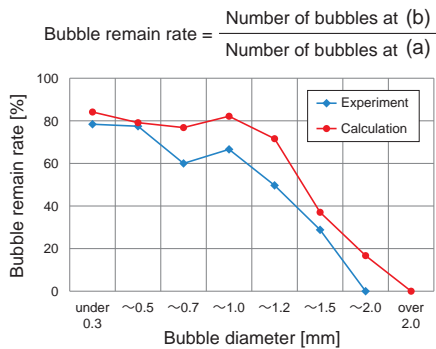


図9 上段油槽(a)部にあった気泡が挿入口(b)部までたどり着いた割合

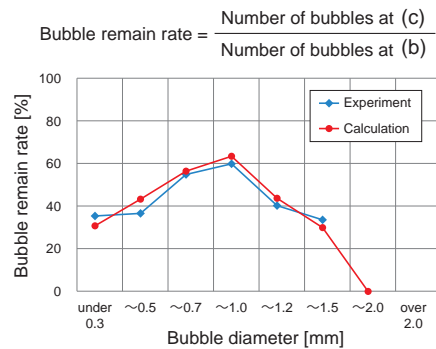


図10 挿入口(b)部ののうち気泡が下段油槽(c)部まで残った割合

今回実機で気泡の可視化を行った結果、エンジン内部での気泡の振る舞い分かり、解析のターゲットとする気泡挙動と気泡径の範囲がはっきりしました。その知見を基に油槽による簡単な気泡のテストを用いながら、気泡の移動と消滅のモデル化を行いました。そして、実際のエンジンを簡略化した装置と比較することで、概ね実測とシミュレーションとの良い相関が確認できました。これらはまだ研究の第一報ですので、引き続き今後も研究を進めていく予定です。

Particleworksを導入後の感想やプロメテックへのご要望と今後のご期待をお聞かせ下さい。

松井様: 今までエンジン内部のオイル挙動に関してトラブルが生じた場合、内部を可視化できるように改造したエンジンを作成し、実際の運転状態を高速度カメラなどで撮影して原因究明をするという手法しかありませんでした。しかしParticleworksで予測解析できるようになったことで、実機でテストすることなく原因究明を推進できるようになりました。また物作前の図面段階で用いることで最適な形状を検討でき、テスト段階でのトラブル発生の抑制にも効果があるといえます。


具体的な検討例としては、動弁系に正しく給油できているか？ オイルが巡回して戻ってくる経路上で油路断面積が足りているか？ ギアなどの回転体とオイルが干渉していないか？ 車体の激しい挙動でオイルの偏りが発生していないか？ などを確認・検討しています。さらに今回のエアレーションモジュールで、オイルポンプが過剰に気泡を吸っていないか？ の確認・検討が出来るようになりました。このエアレーション機能による気泡の追跡は今まで他のCFDソフトでは解析できなかった現象ですから、このような新しい取り組みに対するプロメテック様の対応力やチャレンジ精神もParticleworksを利用していく大きな要因の1つとなっています。今後とも、他の既存CFDソフトでは解析できなかった現象へのチャレンジをぜひ続けていってほしいと思います。また、計算時間の面でも計算機性能の向上に頼るだけでなく、ソルバーの改良なども継続的に推進していただければと期待しています。


本日は、貴重なご意見をどうもありがとうございました。この度は、業務ご多忙の中インタビューにご協力下さり誠にありがとうございました。引き続きより良い製品開発をご支援できるよう、プロメテック一同ご支援させていただきます。


参考資料

Prometech Simulation Conference 2016 講演資料

取材日 2016年9月9日

 <p>HONDA The Power of Dreams</p>	<p>株式会社本田技術研究所 二輪R&Dセンター</p>	<p>事業内容: Hondaモーターサイクルの研究開発機関として、高度なテクノロジーや最新の設備を駆使して信頼性の高い製品を研究開発している。開発された製品は、超大型バイクから、通勤や買い物の足として気軽に使えるファミリーバイクまで多岐に亘る。</p>
	<p>本社所在地: 埼玉県朝霞市 設立: 1960年7月1日</p>	<p>ホームページ: http://www.honda.co.jp/RandD/</p>

 <p>Particleworks® Particle-based simulation software for CAE</p>	<p>Particleworksは粒子法の一つとして開発されたMPS法 (Moving Particle Simulation) の理論に基づく流体解析ソフトウェアです。格子生成が不要な新しい計算手法で、流体を粒子の集まりとして表現し、飛沫などの自由表面をとまなう液体の挙動を高精度に安定して解析できます。</p>
---	---

 <p>Granuleworks® Advanced Simulator for Granular Materials</p>	<p>Granuleworksは、粉体シミュレーションの手法としてもっとも代表的な離散要素法 (DEM) の理論に基づく粉体解析ソフトウェアです。食品、医薬品、化学品、輸送機器、電子材料など、粉体を使った様々な製造プロセスや粉体加工、粉体装置の設計・改良に活用することができ、混合、搬送、充填、圧粉など粉体現象を容易に解析することができます。</p>
---	---

開発元・国内、海外総販売店

PROMETECH.

プロメテック・ソフトウェア株式会社

本社 〒113-0033 東京都文京区本郷三丁目34番3号 本郷第一ビル8階
TEL: 03-5842-4082 FAX: 03-5842-4123

西日本支社 〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄一丁目3番3号 朝日会館7階
TEL: 052-211-3900 FAX: 052-211-3901

URL: www.prometech.co.jp

E-mail: sales@prometech.co.jp

プロメテック・ソフトウェア株式会社に事前の承諾を得ることなく、本記事の全部または一部を使用 (複製・改ざん・頒布・送信・上映) することを禁止します。また、ダウンロード、プリントアウトされた複製物を、不特定または多数の人へ送信・配布することはできません。

本記事の内容は、取材時2016年9月の情報です。製品の機能および構成などは取材時より変更されている可能性がありますので、予めご了承下さい。最新の情報については、プロメテック・ソフトウェア (sales@prometech.co.jp) までお問合せください。